

工艺参数对 20CrMnTi 基激光熔覆 Ni60A-TiC 涂层组织及耐磨性能的影响

任思学^{1,2}, 李景彬^{1,2*}, 史亚盟^{1,2}, 温宝琴^{1,2}, 王贤斐^{1,2}, 李利桥^{1,2}

¹石河子大学机械电气工程学院, 新疆 石河子 832000;

²新疆生产建设兵团工业技术研究院, 新疆 石河子 832000

摘要 为延长平模的使用寿命,采用激光熔覆技术在 20CrMnTi 钢表面制备 Ni60A-TiC 复合涂层。以稀释率和显微硬度为指标,设计三因素三水平正交试验,得出影响熔覆层质量的因素按重要性由大到小排序依次是送粉速率、扫描速度和激光功率。采用 X 射线衍射仪(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)、三维形貌仪以及 X 射线光电子能谱仪(XPS)综合分析了涂层的组织、元素分布和耐磨性能。结果表明:最佳工艺参数组合为激光功率 1.4 kW,扫描速度 7 mm/s,送粉速率 21 g/min;在此工艺参数下制备的涂层的磨损形式主要为磨粒磨损,涂层的显微硬度为 1252 HV,磨损率为 $1.5 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$,表面粗糙度为 1.50 μm ,相比于 20CrMnTi 基体磨损深度降低了 82.1%,复合涂层的耐磨性显著提高。本研究在延长平模使用寿命方面具有较高的参考价值。

关键词 激光技术; 激光熔覆; 工艺参数; 耐磨性能; 正交试验

中图分类号 TG174.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL220806

1 引言

平模制粒机在生物质颗粒燃料和颗粒饲料加工领域被广泛应用。平模作为其关键零部件,长期受到压辊的挤压力、颗粒的摩擦力及挤压产生的摩擦热作用,磨损极其严重,影响了平模制粒机的工作效率和使用寿命^[1-2]。

激光熔覆技术可用于磨损零件的再制造,该技术已被广泛应用于航天、工业和机械等领域^[3]。激光熔覆技术利用高能密度激光束使熔覆材料与基体表面一起熔凝,在基体表面形成熔覆层,从而提高基体的力学性能和耐磨性能^[4-8]。在现有的涂层材料中,镍基自熔合金粉末不仅成本较低,而且在高温下具有优异的耐磨性和耐蚀性,因此被广泛应用^[9-13]。在镍基自熔合金粉末中加入陶瓷颗粒可进一步提高涂层的耐磨性。TiC 具有高熔点、高硬度、高韧性、热化学稳定性好等优点^[14-16],可用作 Ni60A 粉末的增强相。张宏伟等^[17]在 TC4 表面原位合成 TiC 激光熔覆涂层,提升了基材的显微硬度和耐磨性。曹金龙等^[18]利用激光熔覆技术在 45 钢表面熔覆 Ni60-TiC 复合粉末,探究了 TiC 含量对涂层耐磨性、耐蚀性和硬度的影响;研究结果显示, TiC 含量在 20%~30% (质量分数) 时,涂层的综合性能最好。Bakkar 等^[19]研究了不同 TiC 含量 (TiC 的体

积分数分别为 25%、50%、70%) 的金属基复合材料的组织、硬度、耐磨性及腐蚀行为;结果表明:添加体积分数为 25% 的 TiC 后,合金的硬度和耐磨性大大提高。激光熔覆工艺参数会显著影响涂层的成形质量和耐磨性。衡钊等^[20]对 27SiMn 钢表面进行激光熔覆,探究了激光功率对熔覆层力学性能的影响,并得出最佳的激光熔覆功率为 1800 W。Wu 等^[11]探究了工艺参数对 Ni60A 合金裂纹和孔隙率的影响,结果发现孔隙的形成与送粉速率显著相关。Chen 等^[21]探究了激光熔覆预熔 TiC 粉末的最佳工艺参数,并得出了激光功率、扫描速度、粉末厚度和搭接率的最佳工艺参数组合。Verdi 等^[22]探究了激光功率、扫描速度和送粉速率对 Inconel 625-Cr₃C₂ 的影响,并得出了最佳工艺参数组合。Wu 等^[23]对 Ni60A-25% WC 粉末激光熔覆工艺参数进行了优化,结果显示,激光功率对熔覆层稀释率的影响最大,送粉速率、扫描速度和光斑直径对稀释率的影响依次减小。所查资料显示,以平模常用材料中的耐磨性较好的 20CrMnTi 钢为基体,探究激光熔覆 Ni60A-TiC 复合涂层最佳工艺参数的研究很少。鉴于此,本课题组采用激光熔覆技术在 20CrMnTi 钢表面制备 Ni60A-25% TiC 复合涂层,通过分析熔覆层的稀释率、显微硬度、微观组织、元素分布和耐磨性能,探究了包括激光功率、扫描速度和送粉速率在内的激光熔

收稿日期: 2022-04-29; 修回日期: 2022-05-20; 录用日期: 2022-08-08; 网络首发日期: 2022-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(51775358)、石河子大学 2017 年度自主资助支持校级科研项目(ZZZC201738B)

通信作者: *ljb8095@163.com

覆最佳工艺参数组合。本研究可为 20CrMnTi 钢激光熔覆工艺参数的选取提供理论依据,同时对于提高耐磨的耐磨性与使用寿命具有一定的参考意义。

2 试验材料与方法

2.1 基体和熔覆层材料

基体材料是经 870 °C 高温淬火和 200 °C 回火处理的 20CrMnTi 渗碳钢,其尺寸为 60 mm × 32 mm × 8 mm,化学成分见表 1。用砂纸对基体进行打磨,去除其表面的氧化膜和锈迹,之后将其放入 JPS-20B 超声波清洗机中,用无水乙醇(纯度 ≥ 99.9%)振荡 10 min。试验所需粉末 Ni60A 通过气体雾化法制备,粉末粒径为 25~45 μm,纯度为 99.5%,呈光滑的球形,如图 1(a)所示。Ni60A 粉末的化学成分见表 1。TiC 粉末通过碳热还原 TiO₂ 法制备,粒径为 25~45 μm,纯度为 99.5%,TiC 颗粒为不规则的片层状,如图 1(b)所示。激光熔覆复合粉末为 Ni60A-25%TiC 粉末(复合粉末中 TiC 的质量分数为 25%)。为使粉末混合均匀,将粉末放入南京大学仪器厂生产的 QM-QX4 球磨机中干混 2 h,转速为 300 r/min,球磨罐为玛瑙罐,磨球材

表 1 基体 20CrMnTi 和 Ni60A 粉末的化学成分
Table 1 Chemical composition of 20CrMnTi substrate and Ni60A powder

Element	Mass fraction / %	
	20CrMnTi	Ni60A
C	0.17-0.23	0.6-1.0
Si	0.17-0.37	3.0-4.5
Mn	0.80-1.10	
Cr	1.00-1.30	14-17
Ti	0.04-0.10	
B		2.5-4.5
Fe		≤5
Ni		Bal.

质为玛瑙球,粉末与磨球的质量比为 1:3,玛瑙球直径分别为 6、10、12、16 mm。混合均匀后的 Ni60A-25%TiC 粉末如图 1(c)所示。将混合好的粉末放入 101-1B 型电热鼓风干燥箱中进行烘干处理,温度设置为 105 °C,烘干时间为 4 h。

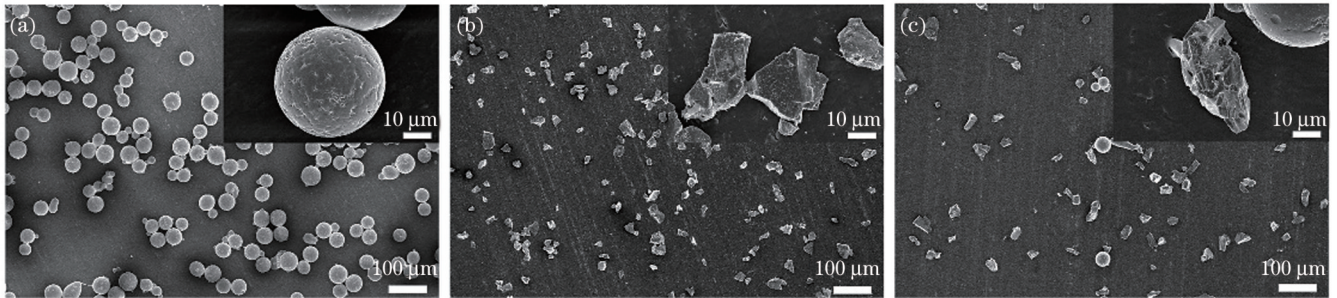


图 1 粉末形貌。(a)Ni60A 粉末;(b)TiC 粉末;(c)Ni60A-25%TiC 复合粉末

Fig. 1 Morphologies of powders. (a) Ni60A powder; (b) TiC powder; (c) Ni60A-25%TiC composite powder

2.2 激光熔覆参数

激光熔覆试验在江苏珠峰光电科技有限公司进行,熔覆设备由 RFL-C4000 光纤激光器、送粉器、水冷却器和工作台组成。试验采用三路同轴送粉方式,保护气体为氩气,气体流量为 10 L/min,搭接率为 33.33%,光斑直径为 3 mm。为获得最佳的 Ni60A-25%TiC 熔覆层,以激光功率 A (kW)、扫描速度 B (mm/s)和送粉速率 C (g/min)为试验因素,探究最优工艺参数组合。设计三因素三水平正交试验,试验因素及水平如表 2 所示,单道熔覆层的几何尺寸如图 2 所示。稀释率 η 的表达式^[24]为

$$\eta = \frac{A_m}{A_c + A_m} \times 100\%, \quad (1)$$

式中: A_c 为熔覆区面积; A_m 为熔合区面积。

2.3 磨损测试和微观形貌表征

在磨损测试开始之前,先依次用 60 目、120 目、240 目、360 目、600 目、1000 目、2000 目砂纸对熔覆试样表面进行打磨,然后用研磨膏抛光,随后将试样放入

表 2 正交试验因素及水平

Table 2 Factors and levels of orthogonal experiment

Level	Laser power / kW	Scanning speed / (mm · s ⁻¹)	Power feeding rate / (g · min ⁻¹)
	Factor A	Factor B	Factor C
1	1.4	5	15
2	1.6	6	18
3	1.8	7	21

JPS-20B 超声波清洗机中用无水乙醇(纯度 ≥ 99.9%)振荡清洗 10 min,清洗结束后用烘干箱烘干。摩擦磨损试验采用兰州中科凯华科技开发有限公司生产的 CFT-I 表面综合测试仪进行,试验环境为室温,载荷为 30 N,摩擦副为 GCr15 钢球(直径 6 mm),转速为 350 r/min,磨损半径为 3 mm,试验时间为 30 min。磨损前后采用上海卓晶电子科技有限公司生产的 BSM-220.4 电子天平称量试样的质量,天平的测量精度为

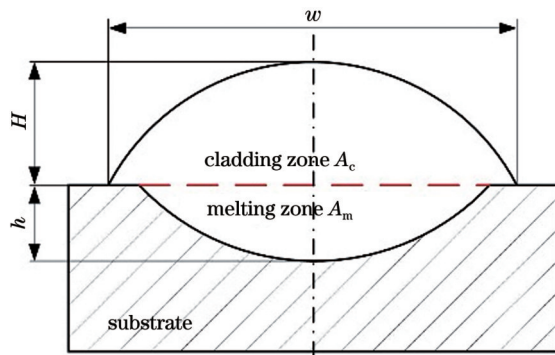


图 2 单道熔覆层的几何尺寸示意图

Fig. 2 Schematic of geometrical size of single-track cladding layer

0.0001 g。对每个样本进行三次试验,以减小误差。

采用泰州市中兴数控机床厂生产的电火花数控线切割机床将涂层试样切割成 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 大小,并进行清洁和干燥处理。使用 Bruker D8 型 X 射线衍射仪(XRD)分析涂层的相组成,衍射角范围为 $20^\circ \sim 70^\circ$,扫描速度为 $3^\circ/\text{min}$ 。采用 Kroll 试剂(由 HF 、 HNO_3 和 H_2O 按体积比为 $1:1:40$ 配制而成)对试样进

行化学蚀刻,时间为 10 s。采用 Nanovea ST400 三维形貌仪、Zeiss Sigma 300 扫描电子显微镜(SEM)和能谱仪(EDS)对试样的磨损状态进行表征。采用 Thermo Scientific 型 X 射线光电子能谱仪(XPS)分析涂层中元素的价态。采用显微硬度计测试涂层的硬度,测试载荷为 0.98 N,保持时间为 10 s,在相同区域测 5 个点,取 5 个点的平均值作为最终的显微硬度。

3 结果与讨论

3.1 正交试验分析

为确定激光熔覆 Ni60A-25%TiC 复合粉末的最佳工艺参数,设计了三因素三水平正交试验,影响因素及水平见表 2。图 2 为单道熔覆层的典型几何尺寸,包括熔覆高度(H)、熔覆宽度(w)、熔覆深度(h)、熔覆区面积(A_c)和熔合区面积(A_m)。单道熔覆试样的横截面形貌如图 3 所示。从图 3 中可以看出,熔覆层致密,熔覆层与基体之间形成了一条结合线,熔覆层整体质量良好,与基体呈良好的冶金结合。测得熔覆区和熔合区的面积,再结合式(1)就可以得到熔覆层的稀释率。熔覆层显微硬度的测试结果见表 3。

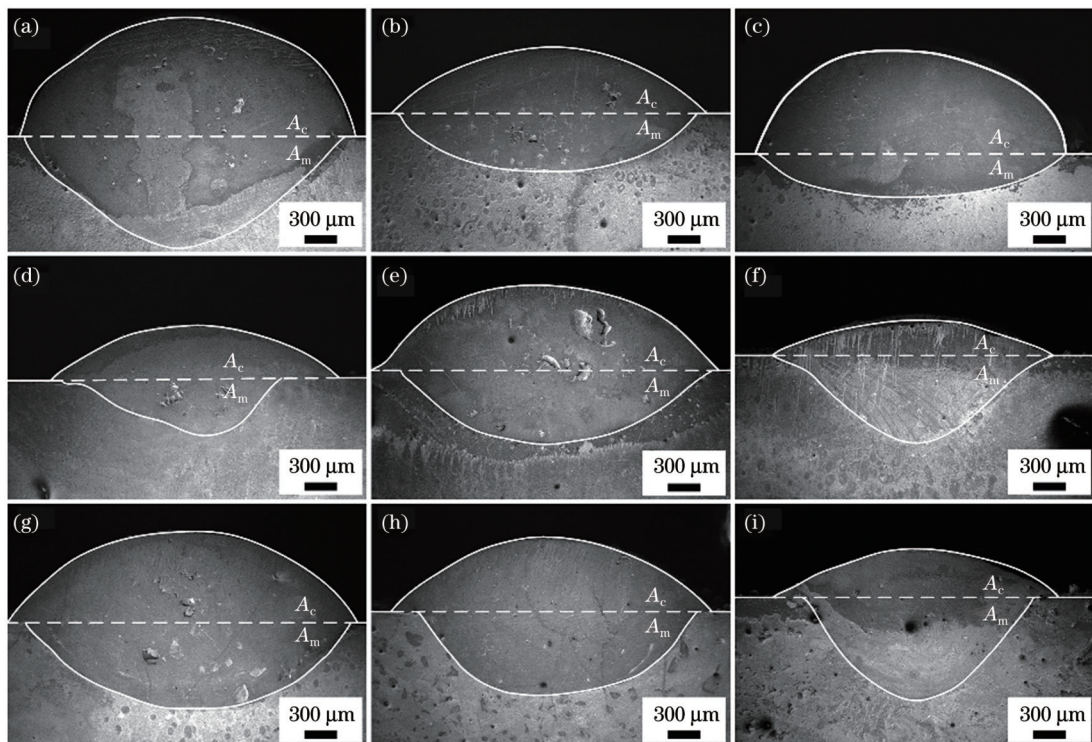


图 3 单道熔覆试样的截面形貌。(a)S1 试样;(b)S2 试样;(c)S3 试样;(d)S4 试样;(e)S5 试样;(f)S6 试样;(g)S7 试样;(h)S8 试样;(i)S9 试样

Fig. 3 Sectional morphologies of samples after single-track cladding. (a) S1 sample; (b) S2 sample; (c) S3 sample; (d) S4 sample; (e) S5 sample; (f) S6 sample; (g) S7 sample; (h) S8 sample; (i) S9 sample

以熔覆层的稀释率和显微硬度为评价指标(两指标的权重相等),采用综合评分法进行评价。采用线性插值法对各指标进行评分。根据工程经验,激光熔覆层的最佳稀释率为 6%。因此,将 6% 设定为 100 分,

20% 设定为 92 分^[25]。随着稀释率增大,评分逐级递减。当稀释率在 0%~6% 范围内时,对应的分数为 0~100 分。若稀释率过小,熔覆层易脱落,得分降低。稀释率越接近 6%,得分越高。假设硬度值达到 1335 HV

表 3 熔覆层表面的显微硬度
Table 3 Microhardness of cladding layer surface

Sample	Microhardness /HV
S1	1225
S2	996
S3	1252
S4	1067
S5	1105
S6	1156
S7	1157
S8	1031
S9	1071

表 4 稀释率评分表
Table 4 Dilution rate score table

Dilution rate	Score
6%–20%	100–92
21%–25%	90–82
26%–30%	80–72
31%–35%	70–62
36%–40%	60–52
41%–45%	50–42
46%–50%	40–32
51%–55%	30–22
56%–60%	20–12
61%–65%	10–2
0%–6%	0–100

时,评分为 100 分,硬度值每降低 35 HV,得分降低 10 分。表 4 和表 5 分别是稀释率和显微硬度的详细评分标准,综合得分为稀释率对应分值与显微硬度对应分值之和。正交试验结果如表 6 所示。经计算,第三组综合分数最高,为 150.93 分,第二组综合分数最低,为 72.47 分。综合评分的方差分析见表 7。

表 5 显微硬度评分表

Table 5 Microhardness score table

Average microhardness /HV	Score
1335–1300	100–90
1300–1265	90–80
1265–1230	80–70
1230–1195	70–60
1195–1160	60–50
1160–1125	50–40
1125–1090	40–30
1090–1055	30–20
1055–1020	20–10
1020–985	10–0

由表 6 和表 7 所示正交试验的极差和方差分析结果可以看出,影响熔覆层质量的因素按重要性从大到小排序依次为送粉速率、扫描速度、激光功率。各方案对应的综合分数反映了熔覆层的整体性能。因此,以稀释率和显微硬度为指标的最佳工艺参数为 $A_1B_3C_3$,即激光功率 1.4 kW,扫描速度 7 mm/s,送粉速率 21 g/min。为了解不同工艺参数下涂层的力学性能,对涂层的物相组成与耐磨性进行分析。

表 6 L9(3³)正交试验结果及分析
Table 6 L9(3³) orthogonal test results and analysis

No.	Sample	Factor			Response value		Comprehensive score
		A	B	C	Dilution rate /%	Microhardness /HV	
1	S1	1(1.4)	1(5)	1(15)	41.3	1225	142.74
2	S2	1(1.4)	2(6)	2(18)	43.8	996	72.47
3	S3	1(1.4)	3(7)	3(21)	21.5	1252	150.93
4	S4	2(1.6)	1(5)	2(18)	46.0	1067	94.43
5	S5	2(1.6)	2(6)	3(21)	43.0	1105	106.12
6	S6	2(1.6)	3(7)	1(15)	54.4	1156	121.74
7	S7	3(1.8)	1(5)	3(21)	45.3	1157	122.02
8	S8	3(1.8)	2(6)	1(15)	62.4	1031	83.29
9	S9	3(1.8)	3(7)	2(18)	50.8	1071	96.60
K_1		122.05	119.73	115.92			
K_2		107.43	87.29	87.83			
K_3		100.64	123.09	126.36			
R		21.41	35.80	38.52			

表 7 综合评分方差分析

Table 7 Analysis of variance of comprehensive score

Source	Degree of freedom	Sum of squares of deviations	Mean square
A	2	718.2	359.09
B	2	2344.8	1172.41
C	2	2381.9	1190.97
Error	2	143.5	71.73

3.2 涂层的物相分析

为分析复合涂层的物相组成,挑选出部分具有代表性的试样(S3、S5、S7和S8)进行XRD分析。复合涂层的XRD图谱如图4所示。在对试样进行激光熔覆时,高能量的激光束使熔覆粉末与基体表面一同熔化,在不同的工艺参数下,Ni60A发生熔化和分解,TiC粉末发生部分熔融^[26],分离出Ti元素和C元素,在

涂层中生成新物相。由图4所知,S3和S7涂层由SiO₂、Cr₂O₃、TiC、NiTiO₃、FeTiO₃和Ti₂O₃组成,S5和S8涂层主要由SiO₂、Cr₂O₃和TiC组成。不同涂层间的物相有所差异,这是因为不同工艺参数下的激光能量密度不同^[11],熔覆粉末出现完全熔化和未完全熔化现象,导致涂层中的元素含量有所不同。所有涂层中均含有SiO₂、Cr₂O₃和TiC相,TiC的形成可以提高涂层的表面硬度。在S3和S5涂层中,SiO₂相的衍射峰强度较高。在4种涂层中,S3涂层的衍射峰强最高,S5次之,S7和S8的衍射峰强较小。在激光熔覆的高温环境中,涂层中生产了SiO₂、Cr₂O₃和Ti₂O₃等氧化物相,这些氧化物相在摩擦力的作用下混合在一起,形成了润滑转移膜^[27]。这些润滑膜可以保护磨损表面,提高涂层的摩擦学性能。涂层中的NiTiO₃和FeTiO₃等盐类物质沉积在磨损表面上层形成的摩擦膜,可以起到润滑和保护磨损表面的作用^[28]。

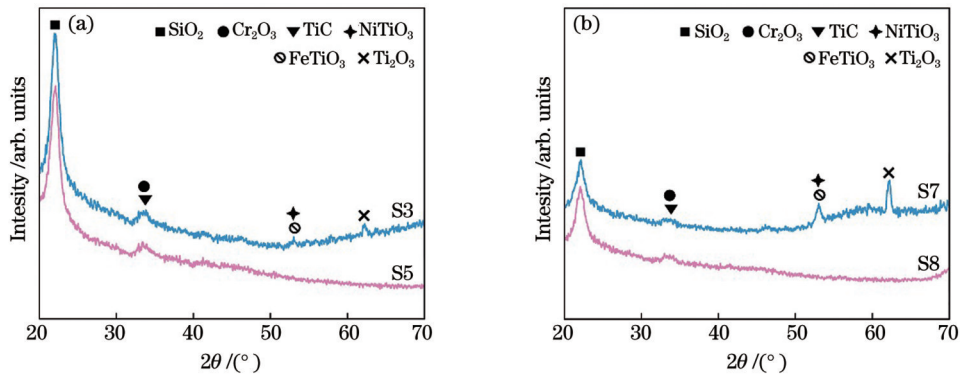


图 4 复合涂层的 XRD 图谱。(a)S3 和 S5 涂层;(b)S7 和 S8 涂层

Fig. 4 XRD patterns of composite coating. (a) S3 and S5 coatings; (b) S7 and S8 coatings

3.3 磨损试验分析

图5(a)~(e)为上述试样在干摩擦条件下的摩擦因数曲线图。本文用S10表示基体。从图中可以清楚地看出,在摩擦开始阶段,所有试样的摩擦因数急剧升高。其中:S1、S2、S3、S5、S7和S8试样的摩擦状态逐渐达到平稳,进入稳定磨损期,上述试样的平均摩擦因数分别为0.64、0.61、0.57、0.63、0.69、0.55;S4试样的摩擦状态不稳定,没有达到平稳摩擦状态;S6、S9、S10试样均处于剧烈磨损状态,摩擦因数曲线波动明显,未能保持平稳。由摩擦因数曲线可知,与基体试样相比,涂层试样的摩擦因数更小,摩擦过程更稳定。

磨损量和磨损率是评价材料耐磨性能的指标。各试样的磨损量与磨损率如图5(f)所示。磨损率 W 的计算公式^[29]为

$$W = \frac{V}{F \times L}, \quad (2)$$

其中,

$$V = \frac{\Delta m}{\rho}, \quad (3)$$

$$L = v \times t \times 2\pi r. \quad (4)$$

由式(2)~(4)可知磨损率为

$$W = \frac{V}{F \times L} = \frac{\Delta m}{\rho \times F \times v \times t \times 2\pi r}, \quad (5)$$

式中: W 为磨损率,即单位长度内单位载荷下的磨损体积, $\text{mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$; V 为磨损体积, mm^3 ; F 为施加载荷, N ; L 为摩擦距离, m ; Δm 为试样的磨损量, kg ; ρ 为试样的密度, kg/m^3 ; v 为试验转速, r/min ; t 为摩擦时间, min ; r 为旋转半径, m 。如图5(f)所示,S1~S10试样的磨损量分别为 25×10^{-4} 、 13×10^{-4} 、 7×10^{-4} 、 8×10^{-4} 、 12×10^{-4} 、 10×10^{-4} 、 9×10^{-4} 、 14×10^{-4} 、 15×10^{-4} 、 30×10^{-4} g。基体S10的磨损量最大,S3的磨损量最小,S10的磨损量约为S3的4.29倍。涂层试样的磨损量均小于基体,且S2~S9试样的磨损量低于或等于S10的50%。根据式(5)计算可得S1~S10试样的磨损率分别为 5.4×10^{-5} 、 2.8×10^{-5} 、 1.5×10^{-5} 、 1.7×10^{-5} 、 2.6×10^{-5} 、 2.2×10^{-5} 、 1.9×10^{-5} 、 3.0×10^{-5} 、 3.2×10^{-5} 、 6.5×10^{-5} $\text{mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ 。显然,涂层试样的磨损率明显低于基体S10的磨损率,说明在20CrMnTi基体上熔覆Ni60A-25%TiC复合涂层,显著提高了基体的耐磨性能。

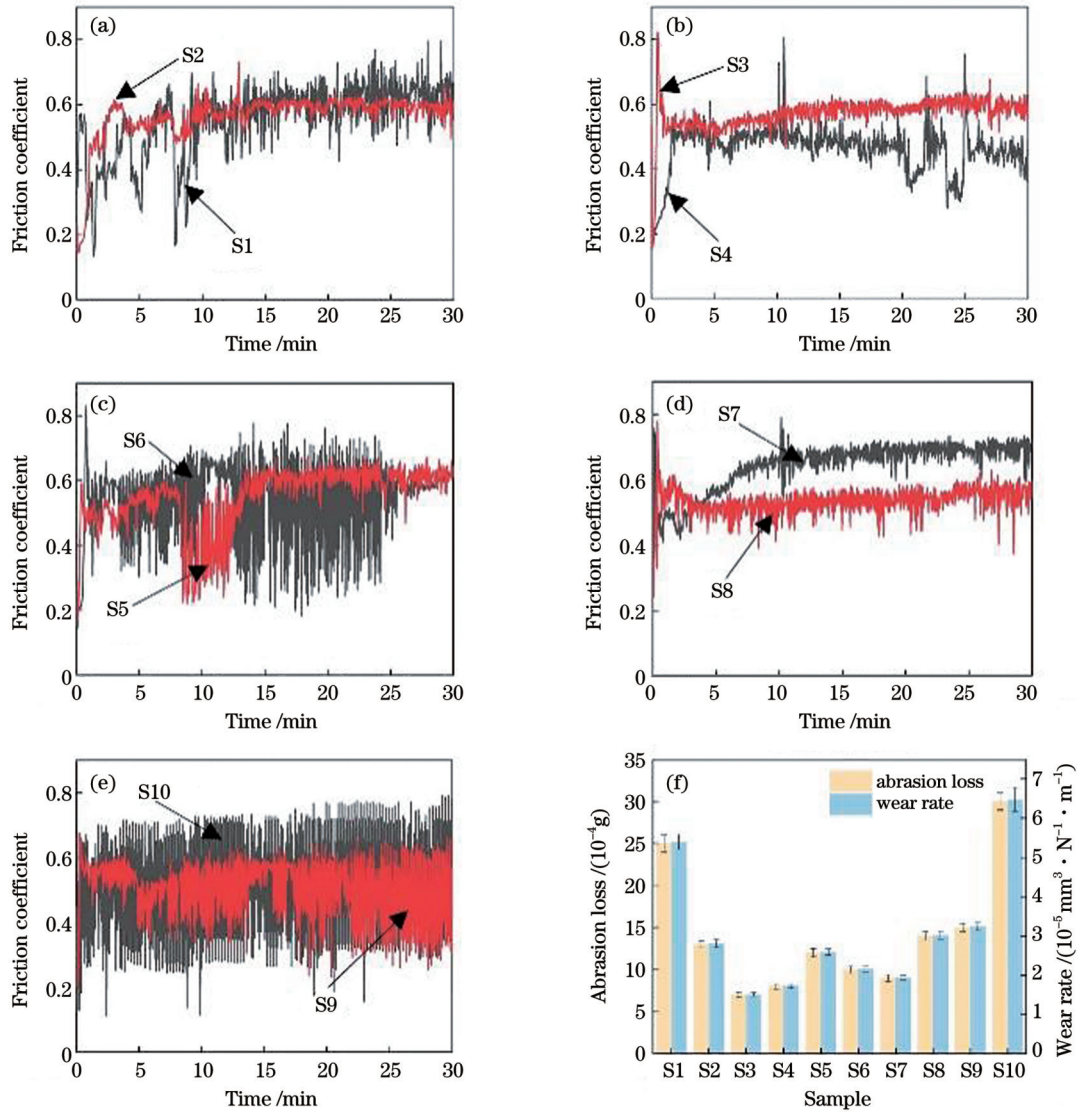


图5 不同试样的摩擦因数曲线、磨损量和磨损率。(a)S1和S2试样;(b)S3和S4试样;(c)S5和S6试样;(d)S7和S8试样;(e)S9和S10试样;(f)磨损量和磨损率

Fig. 5 Friction coefficient curves, abrasion loss and wear rate of different samples. (a) S1 and S2 samples; (b) S3 and S4 samples; (c) S5 and S6 samples; (d) S7 and S8 samples; (e) S9 and S10 samples; (f) abrasion loss and wear rate

图 6(a)~(j)是 S1~S10 试样磨痕的三维形貌图,图 6(k)为磨损试样的表面粗糙度 S_a 和平均磨损深度。可以看出:S3和S4试样的磨痕较浅,表面磨损轻微,三维形貌上的磨痕不明显(虚线之间的部分为磨损痕迹),平均磨损深度分别为 $8.20 \mu\text{m}$ 和 $10.78 \mu\text{m}$,表面粗糙度为 $1.50 \mu\text{m}$ 和 $2.03 \mu\text{m}$ 。基体 S10 的磨痕最深,为 $45.79 \mu\text{m}$,表面粗糙度为 $8.68 \mu\text{m}$ 。S1~S9 试样的平均磨损深度和表面粗糙度均低于 S10 试样(说明涂层的耐磨性能比基体好),其中:S3、S4、S6、S7 的平均磨损深度和表面粗糙度低于 S10 的 1/3;S3 和 S4 的磨损深度相比 S10 分别降低了 82.1% 和 76.5%;S6 和 S7 的平均磨损深度分别为 $14.43 \mu\text{m}$ 和 $13.22 \mu\text{m}$ (相比 S10 分别降低了 68.5% 和 71.1%),表面粗糙度分别为 $1.47 \mu\text{m}$ 和 $1.61 \mu\text{m}$ 。结合图 5 可知,S3 的摩擦因数稳定且磨损量最低。比较 S1~S10 试样的平均磨损深度

和表面粗糙度可知,S3 试样表现出了较好的耐磨性能。

3.4 磨痕形貌分析

图 7 为试样磨损表面的微观形貌。S3 和 S4 试样表面的磨痕较窄,表面发生了不同程度的破坏,并出现了犁沟,但它们的磨损行为不同。在磨损破坏的循环加载力作用下,S3 和 S4 试样表面出现了不同尺寸的磨粒,表面发生了磨粒磨损,磨损表面较为光滑,涂层中生成了氧化物相,磨损轨迹被具有保护作用的氧化膜覆盖,氧化膜与熔覆层之间结合良好。氧化膜是摩擦时产生的氧化物,主要成分为 SiO_2 和 Cr_2O_3 (图 4)。与熔覆层结合良好的氧化膜可以提供固体润滑,有效保护摩擦层,进一步减轻磨损,使摩擦因数较小[图 5(b)],从而获得较小的磨损深度和磨损率[图 6(k)和图 5(f)]。然而,其他涂层中的氧化膜易剥离,磨损痕迹中出现了

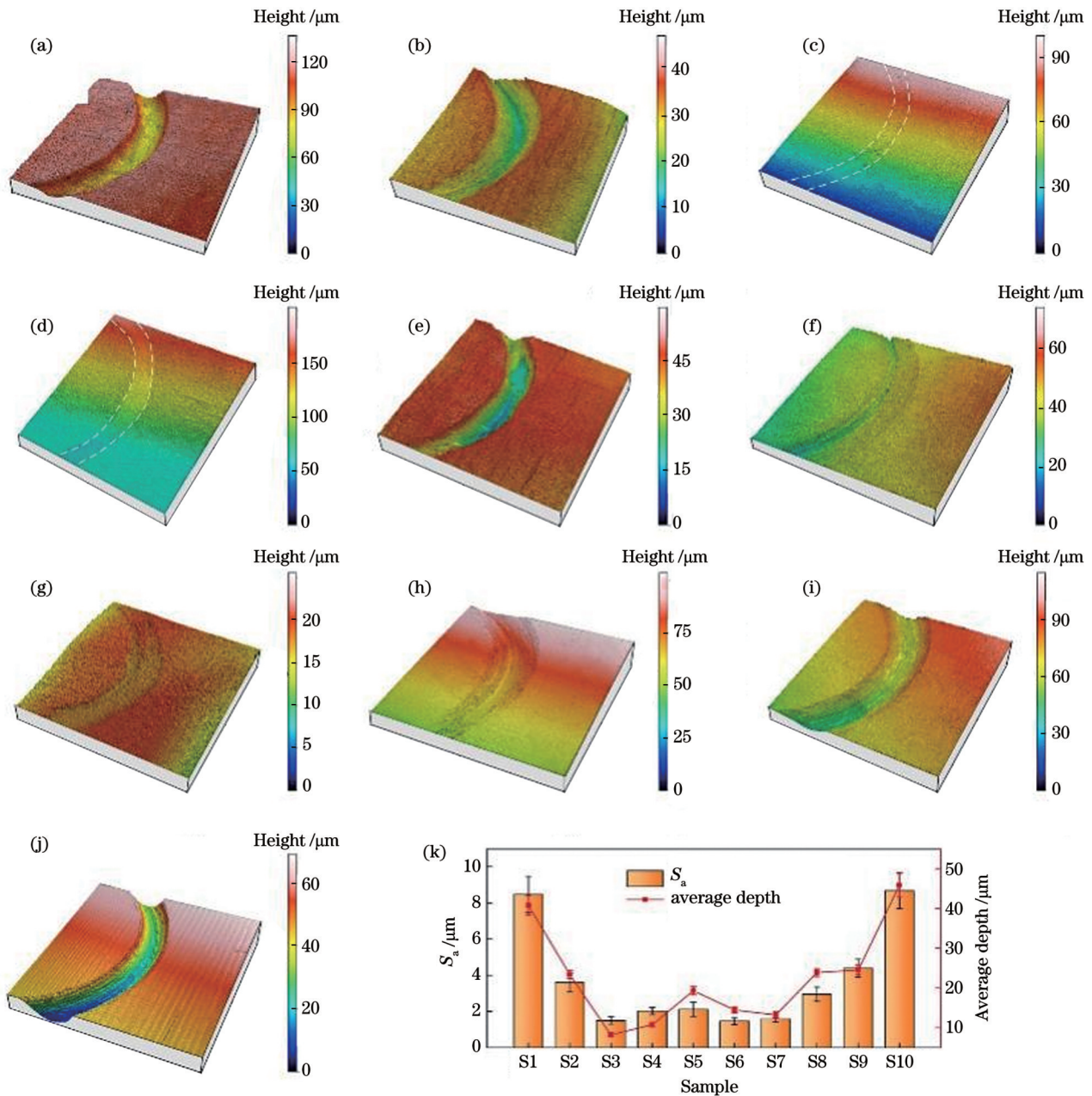


图 6 不同试样磨损表面的三维形貌。(a)S1 试样;(b)S2 试样;(c)S3 试样;(d)S4 试样;(e)S5 试样;(f)S6 试样;(g)S7 试样;(h)S8 试样;(i)S9 试样;(j)S10 试样;(k)表面粗糙度和磨损深度

Fig. 6 Three-dimensional worn morphologies of different samples. (a) S1 sample; (b) S2 sample; (c) S3 sample; (d) S4 sample; (e) S5 sample; (f) S6 sample; (g) S7 sample; (h) S8 sample; (i) S9 sample; (j) S10 sample; (k) surface roughness and wear depth

新裸露出的表面。

S1、S5 和 S7 试样表面主要发生了黏着磨损,表面发生破坏,出现了明显的拉拔现象。S2、S6、S8 和 S9 试样表面主要发生了磨粒磨损和黏着磨损,表面既出现了犁沟,又有磨损产物附着,微观犁耕效应对材料产生了塑性剪切作用,表面出现大片剥落和断裂。摩擦表面很容易被反复破坏而出现凹坑,这是 S6 和 S9 试样摩擦因数处于不稳定状态[图 5(c)和图 5(e)]的主要原因。

基体 S10 的耐磨性较差,表面破坏严重,发生了磨粒磨损、黏着磨损和塑性变形,出现了严重的犁沟和凹坑,而且摩擦因数较高,摩擦曲线波动幅度较大

[图 5(e)]。由于没有熔覆层的保护,基体表面更容易发生破坏,发生磨损时,表面更易脱落,因此磨损深度最大[图 6(k)]。基体 S10 的磨损深度分别是 S3 与 S4 的 5.6 倍和 4.2 倍。

综上,在 10 个试样中,S3 试样表现出了更好的耐磨性。因此,接下来对 S3 试样的磨损表面进行 EDS 分析。EDS 分析结果如图 8(a)所示,白色方框标注部分为试样磨损区域。分析结果表明:氧化层由 Ti、Si、Ni、Cr、O 和少量 C、B 组成,其中,Ni 元素的质量分数为 19.94%,Cr 元素的质量分数为 9.76%,Ti 元素的质量分数为 13.50%,O 元素的质量分数为 38.72%。相

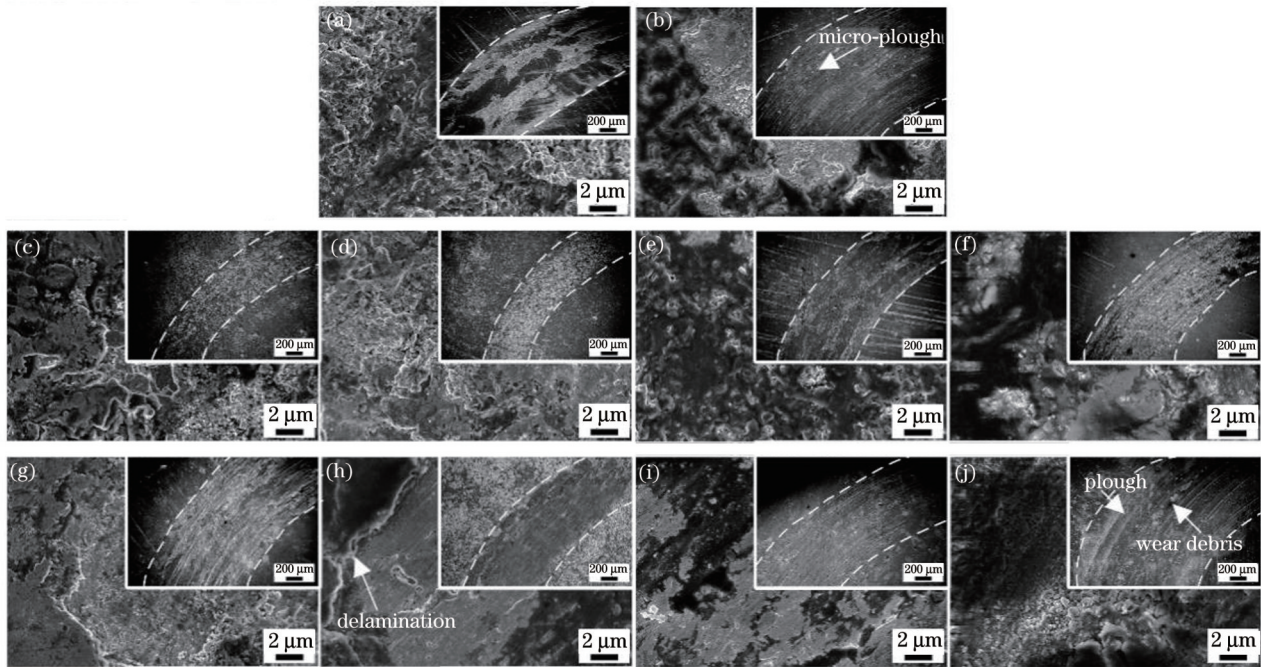


图 7 不同试样磨损表面的微观形貌。(a)S1 试样;(b)S2 试样;(c)S3 试样;(d)S4 试样;(e)S5 试样;(f)S6 试样;(g)S7 试样;(h)S8 试样;(i)S9 试样;(j)S10 试样

Fig. 7 Microscopic morphologies of worn surface of different samples. (a) S1 sample; (b) S2 sample; (c) S3 sample; (d) S4 sample; (e) S5 sample; (f) S6 sample; (g) S7 sample; (h) S8 sample; (i) S9 sample; (j) S10 sample

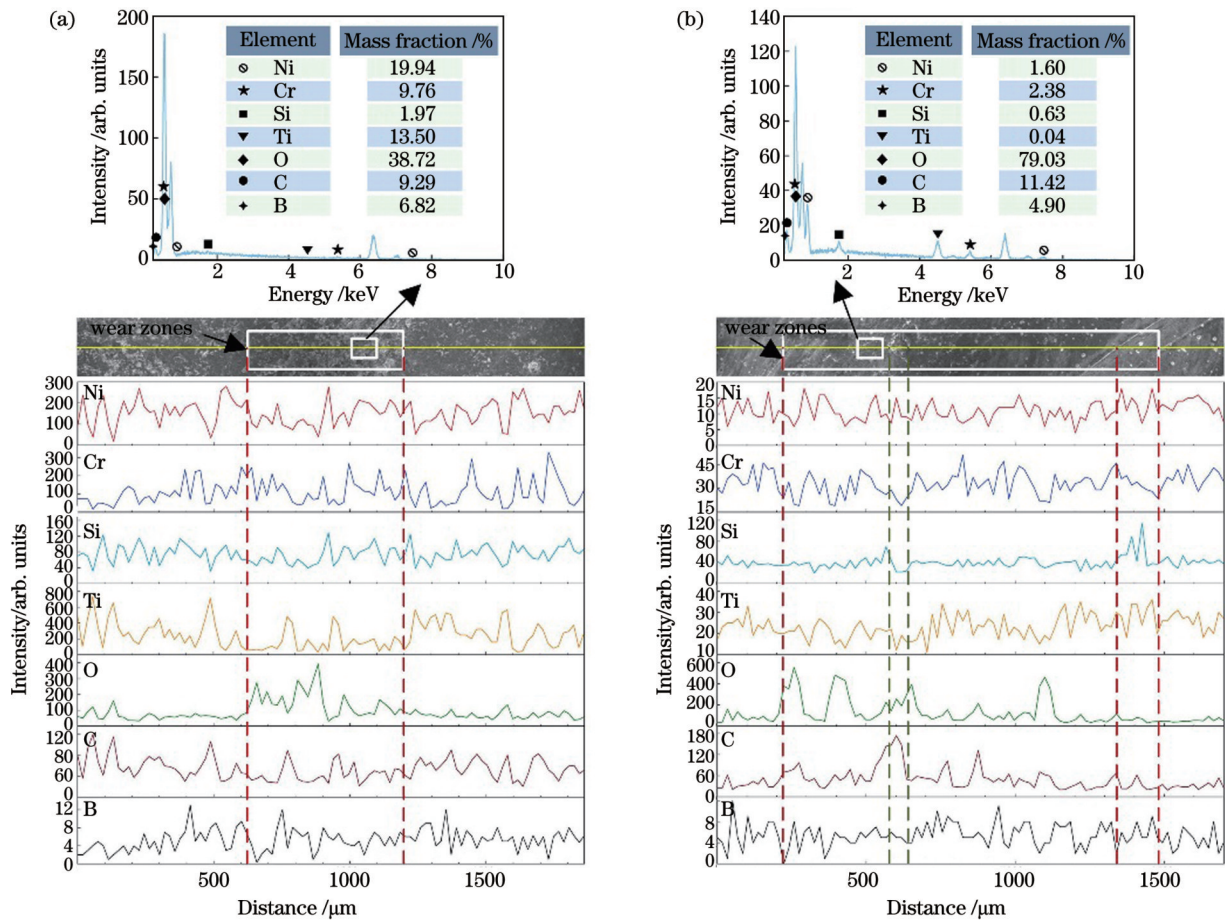


图 8 磨损表面的 EDS 分析。(a)S3 试样;(b)S10 试样

Fig. 8 EDS analysis of worn surface. (a) S3 sample; (b) S10 sample

比未磨损区域,磨损区域的O元素含量较高,这是因为摩擦表面氧化膜的形成使O元素含量增加。O元素的含量取决于接触应力、磨损程度和摩擦产生的温升。一旦试样表面的氧化层被去除,新鲜的表面就会暴露在空气中被氧化。如图7(b)所示,试样S2表面的犁沟是氧化物颗粒、碳化物划擦表面留下的。氧化层可以作为固体润滑剂,保护表面免受进一步损坏,并降低摩擦因数^[30]。

图8(b)为S10试样磨损表面的线扫描结果。由图7(j)可知S10表面出现了点蚀和凹坑,且没有熔覆层保护,表面更容易发生磨损和氧化,因此S10表面的O元素和C元素含量较多(质量分数分别为79.03%和11.42%),而Si、Ti、Cr、Ni和B元素较少。由此可知,基体S10磨损区域的O元素含量高于熔覆试样S3。S10表面磨损严重,这是因为在摩擦时,该表面上可以提供固体润滑的氧化膜不足,无法很好地形成氧化膜来保护基体表面,使摩擦层更容易分层和破坏,加剧磨损。S3试样在摩擦过程中形成了 SiO_2 、 Cr_2O_3 和 Ti_2O_3

等氧化物(图4),可以保护摩擦层。

为了解S3涂层横截面上元素的分布状态,对S3涂层进行mapping图分析,分析结果如图9所示。图9(a)中的曲线是涂层与基体的分界线,曲线上方为Ni60A-25%TiC熔覆涂层,下方为基体。可以看出,熔覆涂层与基体结合良好,未出现裂纹和孔隙。涂层中富含Ni、Cr、Ti、Si和C元素,这是熔覆粉末的主要组成成分。基体中含有大量的Fe和O元素。Ti元素均匀地分布在熔覆层中,如图9(d)所示,其中的绿色块状颗粒为TiC颗粒(可以增强熔覆层的硬度),TiC颗粒均匀分布在熔覆层中,且主要集中在熔覆层顶部,具有弥散强化作用^[31]。Ni和Cr元素是存在于熔覆粉末中而基体中没有的元素(表1),由图9(b)和图9(c)可以看出,基体中也出现了Ni和Cr元素,说明涂层元素发生了扩散。B和Si元素也分布均匀,它们具有固溶强化作用。涂层与基体之间的元素相互扩散、融合,说明涂层与基体结合良好。在弥散强化和固溶强化的协同作用下,涂层的硬度得以提高,耐磨性能得以增强。

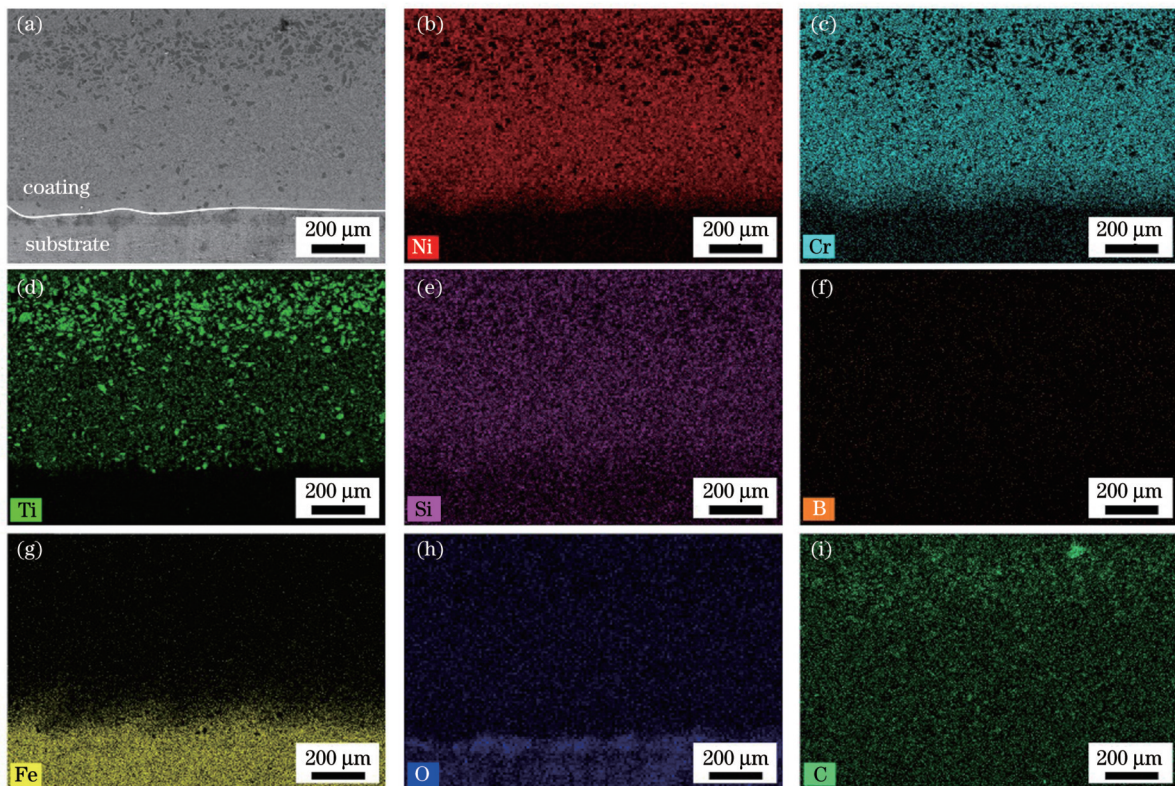


图9 S3试样横截面的EDS分析

Fig. 9 Cross-sectional EDS analysis of S3 sample

3.5 涂层 XPS 分析

为进一步了解S3涂层表面的化学成分,对S3试样进行XPS分析,分析结果如图10所示。图10给出了涂层中O 1s、Si 2p、Ti 2p、Ni 2p和Cr 2p元素的光电子能谱,并指出了它们各自可能形成的化合物。如图10(c)所示,Si 2p轨道中包含两个峰(自旋轨道双峰 $\text{Si } 2p_{3/2}$ 和 $\text{Si } 2p_{1/2}$),结合能102.04 eV和102.96 eV对应

于 $\text{Si } 2p_{3/2}$ 和 SiO_2 ($\text{Si } 2p_{1/2}$)。如图10(d)所示,Ti 2p轨道中形成了双峰,在双峰自旋轨道中,Ti $2p_{3/2}$ 峰位的结合能为454.98 eV,Ti $2p_{1/2}$ 峰位的结合能为458.70 eV,在458.70 eV峰值处形成了 TiO_2 。

在Ni 2p轨道中,双峰自旋轨道分裂且伴有卫星峰产生,如图10(e)所示。Ni $2p_{3/2}$ 中包含NiO和卫星峰,结合能分别为854.94 eV和861.49 eV。Ni $2p_{1/2}$ 峰位的结

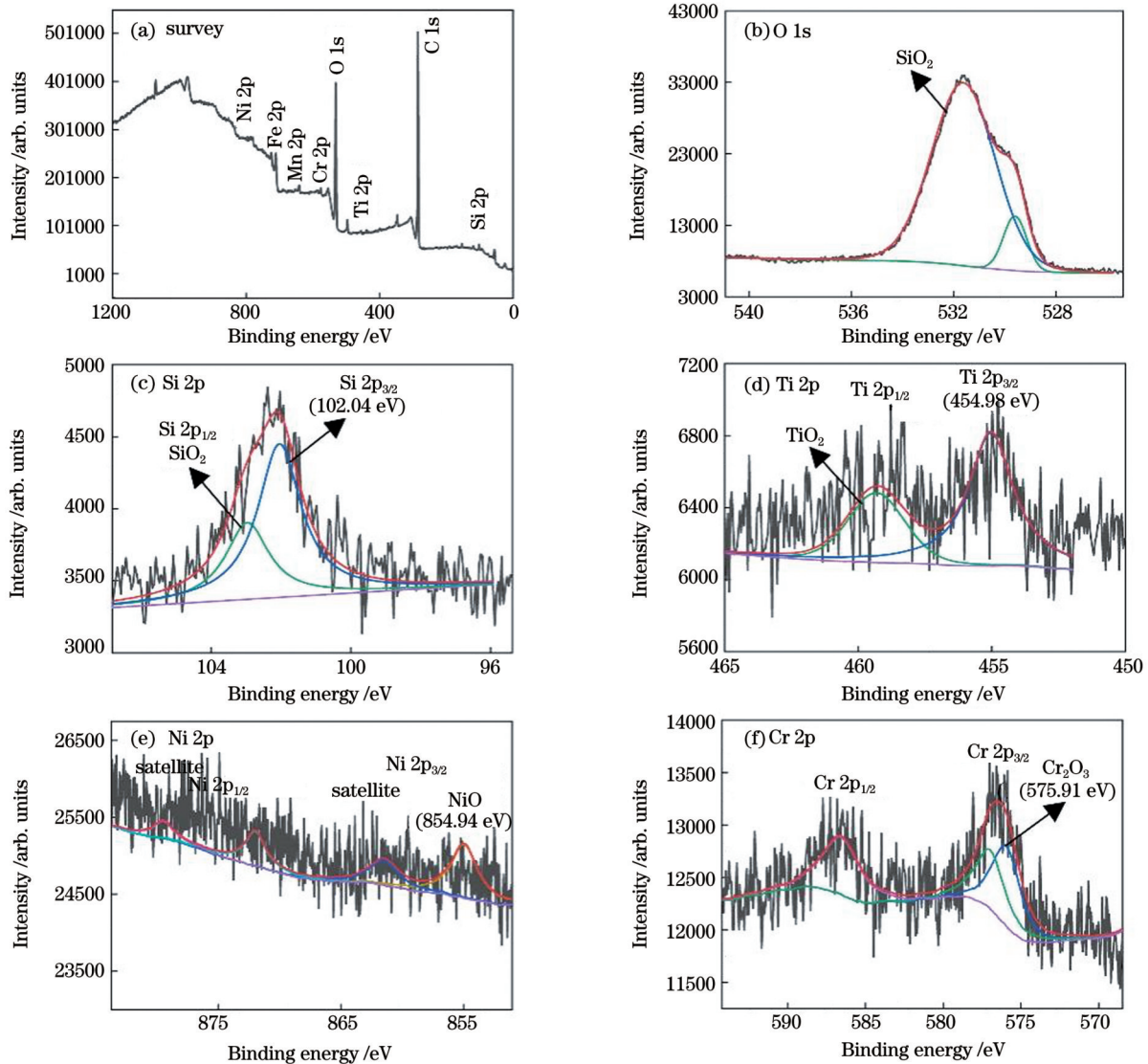


图 10 S3 试样的 XPS 分析

Fig. 10 XPS analysis of S3 sample

合能分别为 872 eV 和 879.50 eV。NiO 可以起到减磨润滑的作用^[32]。Cr 的 2p 轨道由 3 个峰组成,如图 10(f)所示, Cr_2O_3 和 Cr 2p_{1/2} 的结合能分别为 575.91 eV 和 586.49 eV。 Cr_2O_3 耐磨氧化层的形成有利于提高涂层的耐磨性^[33]。结合图 10 与图 4 可知涂层表面的固体润滑膜主要包含 SiO_2 、 Cr_2O_3 、 TiO_2 和 NiO 等氧化物。

4 结 论

选取激光功率、扫描速度和送粉速率三个因素,探究了激光熔覆 Ni60A-25%TiC 复合粉末工艺参数对 20CrMnTi 基体的影响,得到以下结论:

1) 以稀释率和显微硬度为评价指标,通过极差和方差分析得到影响熔覆层质量的首要因素是送粉速率,之后依次为扫描速度和激光功率。

2) 与基体相比,复合涂层的磨损深度、磨损率和表面粗糙度明显降低。Ni60A-25%TiC 复合粉末在激光功率为 1.4 kW、扫描速度为 7 mm/s、送粉速率为

21 g/min 的工艺参数下具有最佳的综合性能。在此参数下,相比于基体,涂层的磨损深度降低了 82.1%,磨损率为 $1.5 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$,表面粗糙度为 1.50 μm 。

3) 基体表面在磨损时发生了剥离,并出现了严重的犁沟和疲劳磨损。涂层磨损表面以磨粒磨损为主,而且涂层与基体结合良好,涂层元素分布均匀,摩擦产生的 SiO_2 、 Cr_2O_3 、 TiO_2 和 NiO 等氧化物颗粒可以作为固体润滑剂,在摩擦表面形成氧化膜,防止摩擦层进一步发生磨损,提高了涂层的耐磨性能。本研究为延长机械零部件的使用寿命提供了一种新思路。

参 考 文 献

- [1] 刘通, 孙桂芳, 张永康. 45# 钢表面激光合金化 NiCr-Al₂O₃ 涂层的组织及耐磨性能研究[J]. 表面技术, 2016, 45(10): 64-69.
Liu T, Sun G F, Zhang Y K. Microstructure and wear resistance of NiCr-Al₂O₃ coating alloyed with 45# steel laser[J]. Surface Technology, 2016, 45(10): 64-69.
- [2] 蒋清海. 饲料粉体旋转挤压成型机理与关键技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018: 21-29.

- Jiang Q H. Study on the mechanism and key technology of rotary extrusion forming of feed powder[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018: 21-29.
- [3] Li M Y, Han B, Song L X, et al. Enhanced surface layers by laser cladding and ion sulfurization processing towards improved wear-resistance and self-lubrication performances[J]. Applied Surface Science, 2020, 503: 144226.
- [4] Zhu L D, Xue P S, Lan Q, et al. Recent research and development status of laser cladding: a review[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 138: 106915.
- [5] Liang H, Miao J W, Gao B Y, et al. Microstructure and tribological properties of AlCrFe₂Ni₂W_{0.2}Mo_{0.75} high-entropy alloy coating prepared by laser cladding in seawater, NaCl solution and deionized water[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 400: 126214.
- [6] 周建忠, 何文渊, 徐家乐, 等. 激光熔覆 Al₂O₃/Fe901 复合涂层的强化机制及耐磨性[J]. 光学学报, 2019, 39(5): 0514001.
- Zhou J Z, He W Y, Xu J L, et al. Strengthening mechanism and wear resistance of Al₂O₃/Fe901 composite coating prepared by laser cladding[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(5): 0514001.
- [7] 吴军, 朱冬冬, 杨日初, 等. 45 钢轴面激光熔覆 Ni60AA 涂层工艺参数优化及摩擦磨损性能研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(11): 1114008.
- Wu J, Zhu D D, Yang R C, et al. Parameters optimization and friction and wear properties for laser cladding Ni60AA coating on 45 steel shaft surface[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(11): 1114008.
- [8] 吴侯, 马朋召, 白文倩, 等. 不同扫描策略下 316L/AISI304 激光熔覆过程中温度场-应力场的数值模拟[J]. 中国激光, 2021, 48(22): 2202002.
- Wu Y, Ma P Z, Bai W Q, et al. Numerical simulation of temperature field and stress field in 316L/AISI304 laser cladding with different scanning strategies[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(22): 2202002.
- [9] Yu T, Chen J, Wen Y M, et al. High temperature phase stability and wear behavior of laser clad Ta reinforced NiCrBSi coating[J]. Applied Surface Science, 2021, 547: 149171.
- [10] Singh G, Kaur M, Upadhyaya R. Wear and friction behavior of NiCrBSi coatings at elevated temperatures[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2019, 28(5): 1081-1102.
- [11] Wu Z P, Li T, Li Q, et al. Process optimization of laser cladding Ni60A alloy coating in remanufacturing[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 120: 105718.
- [12] 张天刚, 张倩, 庄怀风, 等. TC4 表面 Ti₂SC-Ti₂Ni 复合结构相的自润滑激光熔覆层组织与性能[J]. 光学学报, 2020, 40(11): 1114001.
- Zhang T G, Zhang Q, Zhuang H F, et al. Microstructure and properties of Ti₂SC-Ti₂Ni composite structural phase self-lubricating laser cladding layer on TC4 surface[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(11): 1114001.
- [13] 龚玉玲, 崔宸, 武美萍. 纳米 CeO₂ 含量对 Ni60A 涂层组织及耐腐蚀性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(21): 2114007.
- Gong Y L, Cui C, Wu M P. Effect of nano-CeO₂ content on microstructure and corrosion resistance of Ni60A coating[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(21): 2114007.
- [14] Arias-González F, del Val J, Comesana R, et al. Fiber laser cladding of nickel-based alloy on cast iron[J]. Applied Surface Science, 2016, 374: 197-205.
- [15] 刘志宏, 刘元富, 张乐乐, 等. 激光熔化沉积 TiC/CaF₂/Inconel 718 复合材料的组织及高温摩擦磨损性能[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0102008.
- Liu Z H, Liu Y F, Zhang L L, et al. Microstructure and high-temperature friction and wear properties of TiC/CaF₂/Inconel 718 composite fabricated using laser melting deposition technique[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0102008.
- [16] Pan C G, Shi J, Wei J, et al. Effect of preheating temperature on the microstructure and corrosion resistance of TiC-Ni coating by CS/PHIP[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2019, 72(7): 1869-1879.
- [17] 张宏伟, 张顶立, 张天刚, 等. TC4 表面原位合成 TiC 增强钛基复合激光熔覆层的组织及摩擦学性能[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(1): 0114001.
- Zhang H W, Zhang D L, Zhang T G, et al. Microstructure and tribological properties of *in situ* TiC-reinforced Ti-based composite coating by laser cladding on TC4 surface[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(1): 0114001.
- [18] 曹金龙, 杨学锋, 王守仁, 等. 45 钢表面激光熔覆 Ni60-TiC 陶瓷涂层的耐磨耐腐蚀性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(2): 611-617.
- Cao J L, Yang X F, Wang S R, et al. Wear and corrosion resistance of laser cladding Ni60-TiC ceramic coating on 45 steel surface[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(2): 611-617.
- [19] Bakkar A, Ahmed M M Z, Alsaleh N A, et al. Microstructure, wear, and corrosion characterization of high TiC content Inconel 625 matrix composites[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8(1): 1102-1110.
- [20] 衡钊, 舒林森. 激光功率对 27SiMn 钢激光熔覆力学性能的影响[J]. 中国激光, 2022, 49(8): 0802011.
- Heng Z, Shu L S. Effect of laser power on mechanical properties of laser clad 27SiMn steel[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(8): 0802011.
- [21] Chen T, Wu W N, Li W P, et al. Laser cladding of nanoparticle TiC ceramic powder: effects of process parameters on the quality characteristics of the coatings and its prediction model[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 116: 345-355.
- [22] Verdi D, Múnez C J, Garrido M A, et al. Process parameter selection for Inconel 625-Cr₃C₂ laser clad coatings[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92(5): 3033-3042.
- [23] Wu S, Liu Z H, Huang X F, et al. Process parameter optimization and EBSD analysis of Ni60A-25% WC laser cladding[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2021, 101: 105675.
- [24] 刘艳, 刘朋帅, 郭洋, 等. 激光熔覆超高强度钢的稀释率研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(23): 2314005.
- Liu Y, Liu P S, Guo Y, et al. Dilution rate of laser clad ultrahigh strength steel[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(23): 2314005.
- [25] 徐家乐, 周建忠, 谭文胜, 等. 超声振动辅助激光熔覆钴基合金涂层的抗高温氧化性能[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0102006.
- Xu J L, Zhou J Z, Tan W S, et al. High-temperature oxidation resistance of Co-based alloy coatings by ultrasonic vibration assisted laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0102006.
- [26] 王乾廷, 曾宪斌, 陈昌荣, 等. Cr12 模具钢 Fe50-TiC 复合激光熔覆层的形貌、组织和力学性能[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(7): 0714002.
- Wang Q T, Zeng X B, Chen C R, et al. Morphology, microstructure, and mechanical properties of Fe50-TiC composite laser cladding layer on Cr12 mold steel[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(7): 0714002.
- [27] Zhao Y, Feng K, Yao C W, et al. Effect of MoO₃ on the microstructure and tribological properties of laser-clad Ni60/nanoCu/h-BN/MoO₃ composite coatings over wide temperature range[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 387: 125477.
- [28] Han F, Wen H X, Sun J J, et al. Tribological properties of Si₃N₄-hBN composite ceramics bearing on GCr15 under seawater lubrication[J]. Materials, 2020, 13(3): 635.
- [29] Wang T, Wen B Q, Kan Z, et al. Wear behavior of different materials applied on horizontal mixer blades used in the processing of total mixed rations[J]. Transactions of the ASABE, 2019, 62(6): 1743-1753.
- [30] Lashgari H R, Kong C, Adabifiroozjaei E, et al. Microstructure, post thermal treatment response, and tribological properties of 3D

- printed 17-4 PH stainless steel[J]. *Wear*, 2020, 456/457: 203367.
- [31] 刘亚楠, 谷米, 孙荣禄, 等. 钛合金表面激光熔覆原位制备 TiC/Ti₂Ni 复合涂层微观组织及性能研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(14): 1402011.
- Liu Y N, Gu M, Sun R L, et al. Microstructure and properties of *in-situ* TiC/Ti₂Ni composite coating prepared via laser cladding on titanium alloy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(14): 1402011.
- [32] Zhang W Y, Wang C M, Ji J X, et al. Synthetic effect of Cr and Mo elements on microstructure and properties of laser cladding NiCr_xMo_y alloy coatings[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2020, 33(10): 1331-1345.
- [33] Shi Y M, Li J B, Zhang J, et al. Effect of La₂O₃ addition on wear properties of Ni60a/SiC coating using laser-cladding[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 148: 107640.

Effect of Process Parameters on Microstructure and Wear Resistance of 20CrMnTi-Based Laser Cladding Ni60A-TiC Coating

Ren Sixue^{1,2}, Li Jingbin^{1,2*}, Shi Yameng^{1,2}, Wen Baoqin^{1,2}, Wang Xianfei^{1,2}, Li Liqiao^{1,2}

¹College of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, Xinjiang, China;

²Industrial Technology Research Institute of Xinjiang Production and Construction Corps, Shihezi 832000, Xinjiang, China

Abstract

Objective The flat die, a key component of flat die granulators, is subject to severe wear. Laser cladding technology is used widely, and the wear resistance of the flat die can be improved using laser cladding technology. Nickel-based self-fluxing alloy powder has excellent wear resistance and corrosion resistance at a lower cost. TiC ceramic particles were added to the nickel-based self-fluxing alloy powder to enhance the wear resistance of the coating. The previous study showed that the coating had the best all-round performance when the volume fraction of additive TiC was 25%. However, few studies have examined the optimal process parameters for the laser cladding of Ni60A-TiC composite coatings with 20CrMnTi steel as the substrate. Therefore, the Ni60A-25%TiC composite coating was prepared on the surface of 20CrMnTi steel by laser cladding. This study examined the effects of the laser power, scanning speed, and powder feeding speed on the microstructure and wear resistance of the Ni60A-25%TiC coating.

Methods The Ni60A-25%TiC powder was mixed evenly using a QM-QX4 ball mill. A three-factor, three-level orthogonal experiment was designed with the test factors of laser power, scanning speed, and powder feeding speed. Cladding coatings were prepared with different technological parameters. A CFT-I surface comprehensive tester was used for the friction and wear tests. The mass before and after wear was measured using a BSM-220.4 electronic balance. X-ray diffraction (XRD), three-dimensional surface topography, scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectroscopy (EDS), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), and microhardness tester were used to characterize the phase composition, 3D morphologies, microstructure, element distribution, and element valence and microhardness of the coatings, respectively.

Results and Discussions The coating after laser cladding was dense and showed good metallurgical bonding with the substrate (Fig. 3). The dilution rate and microhardness of the cladding layer were used as evaluation indices. The factors affecting the quality of the cladding layer in descending order were the powder feeding speed, scanning speed, laser power which was obtained by the extreme difference (Table 6) and variance (Table 7) analysis. XRD revealed the main phase composition in the coating to be SiO₂, Cr₂O₃, and TiC. The coating phase varied slightly with the different process parameters (Fig. 4). The friction and wear test showed that the frictional state differed according to the process parameters. The friction coefficient of the coating samples was small, and the wear process was stable. Among them, S3 sample had the lowest wear rate of $1.5 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$. The microscopic morphology at the abrasion area of the sample was analyzed (Fig. 7). Abrasive wear occurred on the surfaces of the S3 and S4 samples; the wear surfaces were relatively smooth, and the coatings were covered with oxide films, such as SiO₂ and Cr₂O₃, in the friction process. The surface of the S1, S5, and S7 samples mainly showed adhesive wear. The surface of S2, S6, S8, and S9 samples mainly showed abrasive and adhesive wear. The wear resistance of the S10 substrate was poor, and the surface showed abrasive wear, adhesive wear, and plastic deformation, and severe furrows and pits appeared. The above analysis showed that S3 showed better wear resistance. The hardness and wear resistance of the coating was enhanced by the synergistic effect of dispersion strengthening and solid solution strengthening. XPS showed (Fig. 10) that the solid lubricant film of the S3 coating was comprised mainly of oxides, such as SiO₂, Cr₂O₃, TiO₂, and NiO.

Conclusions Using the dilution rate and microhardness as evaluation indices, the factors affecting the quality of the cladding layer from the largest to smallest were the powder feeding speed, scanning speed, and laser power. The composite coating showed a significantly lower wear rate compared to the substrate. The Ni60A-25%TiC composite coating with the best all-around performance was produced at a laser power of 1.4 kW, scanning speed of 7 mm/s, and powder feeding speed of 21 g/min. Severe furrows and fatigue wear were observed on the substrate surface, and the wear of the cladding layer was mainly abrasive. Oxide particles, such as SiO₂, Cr₂O₃, TiO₂, and NiO, generated by friction can be used as solid lubricants to form oxide films on the friction layer surface that can prevent further wear of the friction layer and improve the wear resistance of the coating.

Key words laser technique; laser cladding; process parameter; wear resistance; orthogonal experiment